

**BARLANGKLIMATOLÓGIAI MÉRÉSEK KÉT KÜLÖNBÖZŐ
KARSZTTERÜLETEN ELHELYEZKEDŐ MAGYARORSZÁGI
BARLANGBAN**

**CAVE CLIMATOLOGY MEASUREMENTS OF TWO DIFFERENT
KARST AREA IN HUNGARY.**

MULADI BEÁTA¹, CSÉPE ZOLTÁN², MUCSI LÁSZLÓ¹,

¹*Szegedi Tudományegyetem- Természeti Földrajzi és Geoinformatikai
Tanszék Egyetem u. 2-6 H-6721 Szeged, Magyarország*

²*Szegedi Tudományegyetem – Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszék Egyetem
u. 2-6 H-6721 Szeged, Magyarország muladi@geo.u-szeged.hu, csepzol@geo.u-
szeged.hu, mucsil@geo.u-szeged.hu*

Abstract: Due to some extreme weather conditions (e.g. droughts, inland waters or floods, etc.), occurring in the Carpathian Basin, climatic fluctuations can be detected in Hungary that can also modify some environmental factors in caves. The study aims at analyzing to which extent surface temperature changes influence cave air temperature. Two different types of caves were selected for the analysis: a tectonically performed epigenetic cave (Hajnóczy Cave) and a typical swallow cave (Trió Cave). Cave air temperature was determined in order to feature the degree of anthropogenic impact, as well as to study the effect of changing surface temperature to the cave air temperature. To test applicability of a wireless sensor network in cave temperature measurement, an UC Mote Mini low power wireless sensor module was used for our measurements. Temperature data were recorded at 10-minute intervals. The obtained data were evaluated using a matrix of correlation coefficients as to identify the communication network between the passages. In the Hajnóczy cave, the average temperature varies between 4.7 to 10.8°C. The daily surface temperature oscillation in the cave still possible to detect at the Almonds. Using the correlation analysis is presented in the Leyla and Almonds data, which show a close relationship with the Housetop data, in both cases, the correlation is 0.88. The human impact on the air temperature of Trió Cave is unambiguous, raising the inside temperature with 0.05°C or 0.6°C in the case of 3 and 28 visitors, respectively.

1. Bevezetés

Jóllehet a barlangi hőmérsékletet többnyire állandónak titulálják, azonban a felszíni hőmérséklet hatást gyakorol a barlangi légkörzés rendszerére, csak bizonyos hatások tompítottabban jelentkeznek a járatokban. A barlangok klímáját energiaforgalmuk, valamint a barlang és a felszín közötti energiacserék, továbbá a helyi felszíni éghajlati viszonyok alakítják (FODOR 1981). Ugyanakkor minden barlangnak más a légkörzése, így teljesen egyedi barlangklíma alakul ki. A barlangok eltérhetnek a morfológiájukban, a repedéshálózatukban, valamint a bejáratuk helyzetében. Ezek a paraméterek mind befolyásolják a barlang átszellőzését (RAJCSY

2000).

A barlangok jótékony hatása annak köszönhető, hogy bennük a hőmérséklet 10°C körüli és magas a páratartalom. Ez a por-, csíra-, és allergénmentes környezet elősegíti a felső légúti betegségekben szenvedők tüneteinek csillapítását, sőt teljes gyógyulásukhoz vezethet (*JAKUCS* 1999).

A hosszú távú barlangi klímáparaméterek mérésével válasz kaphatunk arra kérdésre, hogy vajon a felszínen végbemenő klímaváltozás hozzájárulhat-e a barlangok klímájának megváltozásához, s ezáltal gyógyhatásuk módosulásához. A barlangok hasznosítása szempontjából is fontos ezen klímáparaméterek mérése, mivel a turizmus számára megnyitott barlangokba érkező látogatók jelenléte módosítja a barlangi hőmérsékletet. A barlangi klíma kutatása segítheti a nemzeti parkok barlangturisztikai hasznosítását, a látogató csoportok ideális létszámának a meghatározását, valamint az általuk okozott hőmérsékleti többlet káros hatásának a meghatározását (*KAFFAI* 2008).

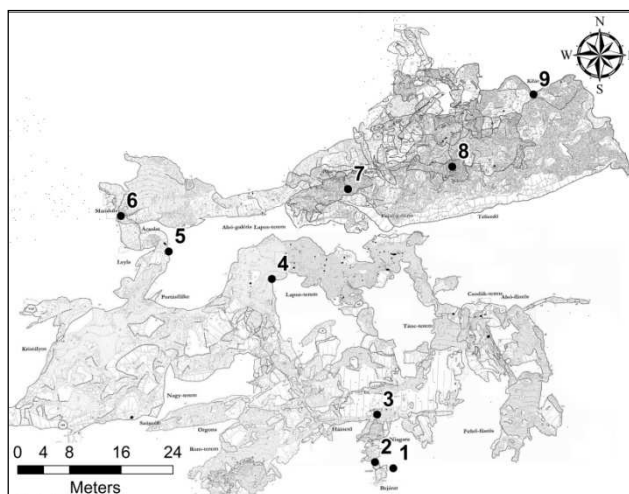
A fentiek értelmében célkitűzésünk az alábbi kérdések megválaszolása. A két különböző karsztterületen elhelyezkedő barlangban hogyan érvényesül a felszín hatása, nevezetesen (1) a felszín és a barlangok hőmérséklete közötti kapcsolat feltárása; a felszínen megjelenő hőmérsékletváltozások és milyen mértékben érvényesülnek a barlangban, (2); a módszertanilag újdonságnak számító, vezeték nélküli szenzorhálózatok miként alkalmazhatók a barlangi hőmérséklet, páratartalom és légnyomás mérésében. Ezenkívül a fenti mérések segítségével célul tűztük ki a barlangi légáramlásoknak, valamint a barlanghőmérsékletre gyakorolt antropogén hatás mértékének a tanulmányozását. .

2. Mintaterület

A vizsgálathoz két magyarországi karsztterületet barlangját választottuk ki.

2.1. A Hajnóczy-barlang

A Hajnóczy-barlang a délnyugati Bükkben ladini-karni tűzköves, illetve tűzkömentes szürke mészkőben alakult ki. , A bejárata hegyoldalban 475 m tszf. magasságban nyílik, járatok összhossza 4257 m, 125 m vertikális kiterjedésű (http://www.termeszetvedelem.hu/index.php?pg=cave_5382-2). A barlang felszín közeli szakaszát vizsgáltuk.



1. ábra. Hajnóczy-barlang poligon vonala és a szenzorok helye (saját térkép)
 Figure 1. The polygon of Hajnóczy Cave with the places of the sensors.

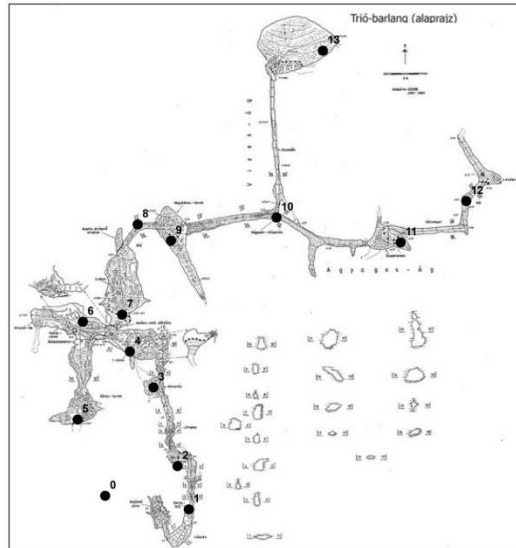
A barlang járatainak iránya észak-északkelet – dél-délnyugati, erre erőteljes litokázis rendszerrel. A barlangnak két jól elkülöníthető része van: (1) egy réteglap menti oldással, majd korróziós folyamatokkal kialakult, szűkületekben gazdag járatrendszer, amely a bejáratától a Nagyteremig tart, (2) egy domináns eróziós folyamatokkal létrejött szakasz, ahol nagy formák (pl.: Óriás-terem, amely 40x20m kiterjedésű) és a nagy termek közötti törmelékhalmozatok, szűkületek (pl.: Mandula: 0,7mx0,4 m) a jellemzőek (1. ábra).

2.2. Trió-barlang

Magyarország délnyugati részén, a Nyugat-Mecsek karsztos területén elhelyezkedő barlang triász korú karbonátos kőzetekben alakult ki (BAUER 2011).

A Szuadó-völgyben található barlang bejárata a völgytalpon nyílik, 297m magasságban. Tipikus völgytalpi víznyelő barlang, mely a jelenlegi állapotában már csak időszakosan aktív (BARTA 2009).

A barlang 255 m hosszú és 58 m mély. Morfológiailag három részre lehet osztani (2. ábra). Az első része egy szűk járatrendszer, ezt követi az aknarendszer, majd az elágazás után az Agyagos-ágon és a Vizás-ágon eljuthatunk a barlang két végpontjába (BAUER 2011).



2. ábra. Trió-barlang alaprajzánrajzán jelölt eszközök helye (saját ábra, SZKBE alapján)
 Figure 2. The layout of Trió Cave and the location of the deployed devices.

3. Módszerek

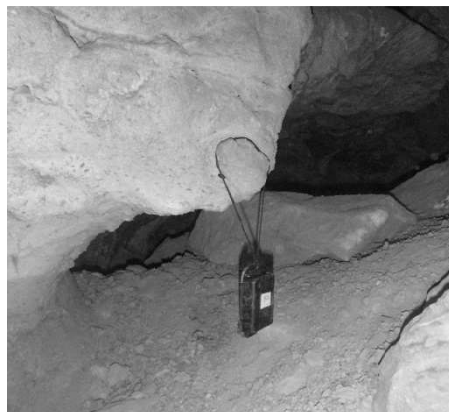
Az UC Mote Mini alacsony fogyasztású vezeték nélküli szenzor modult alkalmaztuk a vizsgálatainknál. Ez az eszköz támogatja az IEEE 802.15.4/ZigBee vezeték nélküli kommunikációs szabványt, melynek segítségével alacsony adatátviteli sebességet tesz lehetővé. A rádió modul 250kbps adatátvitelre képes, melyet a 2.4Ghz-es ISM sávban biztosítja. A vezérlésről egy 16 MHz-es Atmel ATmega128RFA1 mikroprocesszor gondoskodik, mely 128kB RAM-mal rendelkezik. Az eszközbe gyárilag a következő érzékelők vannak beépítve: fényszenzor, nyomásmérő szenzor, hőmérséklet érzékelő, páratartalom érzékelő.

Az SHT21 hőmérséklet szenzor felbontása $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$, pontossága $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$. A SHT21 páratartalom érzékelő felbontása $\pm 0,04\%\text{RH}$ és a pontossága $\pm 2,0\%\text{RH}$. Az adatok tárolására 2Mbyte flash memória áll rendelkezésünkre. Az eszköz operációs rendszere a nyílt forráskódú TinyOS, melynek segítségével lehet programozni az eszközt. Az áramellátásról egy LIR2450 elem gondoskodik. Minden vizsgálatunk alkalmával 10 percenkénti adatrögzítéssel mértünk, és akár 3 hónapig is tudtuk használni az eszközt anélkül, hogy elemet kellett volna cserélni a szenzorokban.

A Hajnóczy-barlang 9db (ebből három szenzor légnyomás adatokat is tud mérni) mértük a hőmérséklet és páratartalom adatokat. Egy szenzorral

mindig a barlang bejárata közelében, a felszíni hőmérsékletet is rögzítettük (1. ábra).

A Trió-barlangban csupán időszakos megfigyeléseket végeztünk, s az imént bemutatott mérés során 13 db műszert használtunk (2. ábra).



3. ábra. Uc Mote Mini (saját ábra)
Figure 3. Uc Mote Mini

Annak ellenére, hogy a felszínen akár 100 m távolságban is észlelik egymást a szenzorok, a barlangban mért távolságot meghatározza a barlang geometriája is; az elérhető távolság lehet akár mindössze 20-25 m (MULADI 2012). Az eddigi mérések során a rádió modul a letöltés során, valamint a szenzorhálózati térkép elkészítésénél alkalmaztuk.

A Hajnóczy-barlang esetében korrelációs mátrix segítségével vizsgáljuk a különböző adatsorok kapcsolatrendszerét. A korrelációs együttható (r) kifejezi a két változó közötti kapcsolat szorosságát.

$$r = \frac{\sum (x - M_x) \cdot (y - M_y)}{\sqrt{\sum (x - M_x)^2 \cdot \sum (y - M_y)^2}},$$

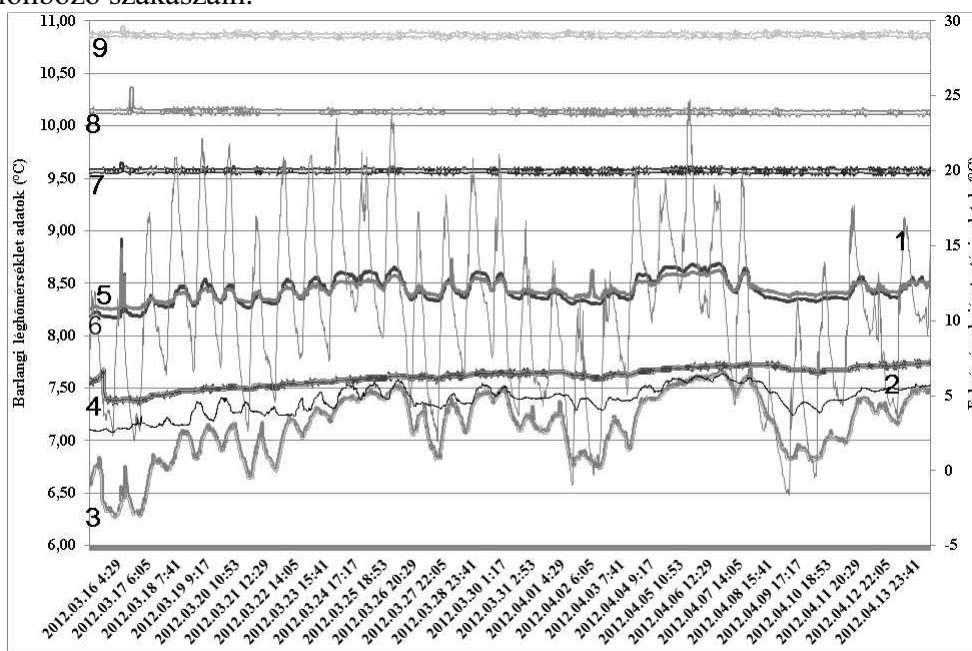
ahol M_x az x változó, M_y az y változó számtani közepe. A formulában belátható, hogy a korrelációs együttható értéke +1 és -1 között változhat. Amennyiben az együttható értéke pozitív, a két változó közötti egyértelmű, a negatív érték pedig ellentétes értelmű kapcsolatra utal (PÉCZELY 1979).

4. Eredmények

4.1. A Hajnóczy-barlang

E barlangban már történtek előzetes vizsgálatok (Miklós Gábor és Városi József 1975-1977 nyaranta; Németh Gyula 1978 óta radon mérések), mely adatok az akkori klíma viszonylatában referenciaként szolgálhatnak a jelenlegi vizsgálatokhoz.

2011 december 10.-én kezdtük meg az egyévesnél hosszabb időtartamú méréseinket abból a célból, hogy megfigyeljük az éves barlangi légcseré folyamatát, valamint kimutassuk, hogy a felszíni hőmérséklet hatására kialakuló téli-nyári huzatfordulás miként érvényesül a barlang különböző szakaszain.



1-Felszín, 2-Bejárat után, 3-Háztető, 4-Lapos-terem, 5-Leyla, 6-Mandula, 7-Galéria,
8-Galéria és Óriás-terem között, 9-óriás-terem,

4. ábra. Hőmérsékleti adatok a Hajnóczy-barlangban (2012 március 10. - 2012 április 14.).

Figure 4. Temperature data for Hajnóczy Cave (March 10, .2012 – April 14, 2012).

A vizsgált időszakból a 2012 március 10. – április 14. között mért adatainkat mutatjuk be (4. ábra). Ebben az időszakban a felszíni hőmérséklet a barlang bejárata közelében az átlaga 10°C minimuma -1,5°C, a maximuma 24°C volt.

Az adatsoron a 9 műszer által mért hőmérsékleti adatokat láthatjuk. A felszíni (1) és a bejárat utáni (2) helyszíneken elhelyezett szenzorok adatait a másodlagos tengelyen, míg a többi adatsort az elsődleges tengelyen ábrázoltuk az áttekinthetőség érdekében. A bejárat közelében elhelyezett műszerek adatain jól látszódik, hogy szorosan követik a napi felszíni ingást. Amikor a felszíni hőmérséklet 5°C alá esik a barlangban jelentősebb

változást generál a hidegebb légtömeg. A felszínen a napi hőmérséklet változás étéke 10-15°C között mozog, mely a bejárat utáni szakaszon 1-1,5°C, a Háztetőnél 0,4-0,5°C, valamint a Leyla és Mandula esetében 0,1-0,2°C hőmérséklet változást generál.

A barlang különböző pontjaiban vizsgált (4. ábra) léghőmérsékletek átlaga alapján elmondható: a leghidegebb szakasz az közvetlen a bejárat után helyezkedik el(2) 4,7°C. A Háztetőnél (3) már ennél melegebb átlag léghőmérséklet 7,1°C uralkodik a 2012. évi tavaszi időszakban. A barlang vizsgálat szakaszán a legmélyebben elhelyezett szenzor a Lapos-teremben van, ahol az átlaghőmérséklet értéke 7,61°C. A további vizsgált pontok relatív helyzete egyre magasabban található, így Leylánál és Mandulánál elhelyezett szenzoroknál 8,4°C hőmérséklet a jellemző. Folyamatosan közeledve a felszín felé Galéria(7) 9,5°C, Galéria és Óriás terem között(8) 10,1°C, és az Óriás-teremben (9) 10,8°C a vizsgált időszak átlag léghőmérséklete.

1. táblázat

Table 1.

A Hajnóczy-barlang hőmérséklet adataira számított korrelációs mátrix. (2012 március 12. – 2012 április 11.) (szignifikancia szint 0,01; 0,05)
Correlation matrix of the temperature data, Hajnóczy-Cave, (12.03.2012.–11.04.2012) (significance level 0.01; 0.05).

	Háztető ő (3)	Mandula (6)	Leyla (5)	Lapos- terem (4)	Felszín (1)	Galéria és Óriás- terem között (8)	Galéria (7)	Óriás- terem (9)	Bejárat után (2)
Háztető (3)	1								
Mandula (6)	0,88	1							
Leyla (5)	0,88	0,95	1						
Lapos-terem (4)	0,70	0,48	0,63	1					
Felszín (1)	0,44	0,65	0,54	-0,02	1				
Galéria és Óriás-terem között (8)	-0,21	-0,10	-0,20	-0,51	0,14	1			
Galéria (7)	0,13	0,29	0,19	-0,18	0,34	0,21	1		
Óriás-terem (9)	-0,22	-0,31	-0,23	0,10	-0,42	-0,12	<i>-0,03</i>	1	
Bejárat után (2)	0,87	0,73	0,81	0,80	0,17	-0,31	0,02	-0,02	1

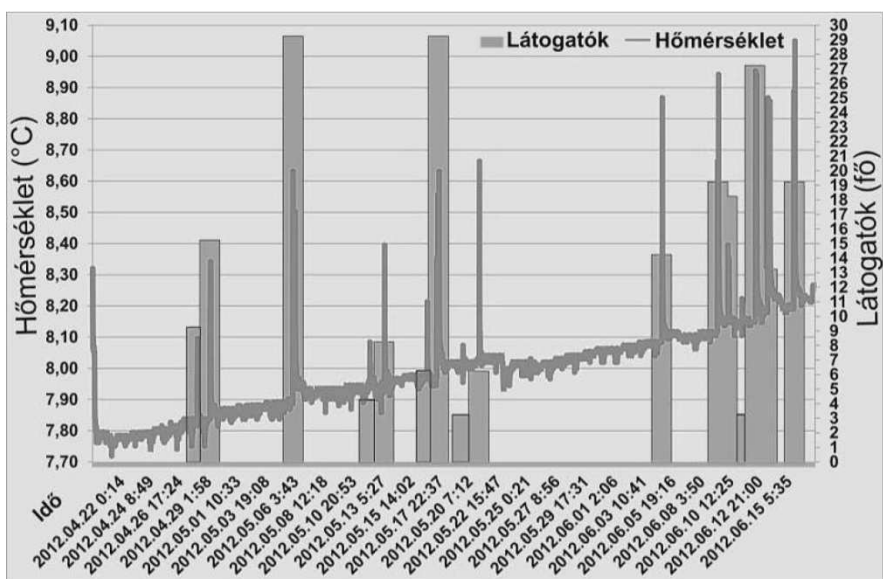
Elkészítettük a barlangban rögzített adatokra, és a felszíni adatsor korrelációs mátrixát. Azokat az értékeket vettük figyelembe, ahol a szignifikancia szint értéke 0,01. A korrelációs mátrix segítségével meghatározhatjuk a különböző adatsorok kapcsolatát.

A korrelációs értékek alapján (*I. táblázat*) a legszorosabb kapcsolat (0,95) a Leyla és a Mandula esetében áll fenn, ez azzal magyarázható, hogy itt elég közel vannak egymáshoz (10 m) a szenzorok (az adatgyűjtés szükségességét mindkét helyen fontosnak találtuk, mert a bejáratától való távolság és a járatok keresztmetszetének értéke fontos tényező a klíma vizsgálatokhoz), ezen barlangszakaszon nagyon változatos a járatok morfológiája. A Leyla és a Mandula két nagyobb légtérrel választ el egyre szűkülő járataival. A Leyla, melynek keresztmetszete 2x1,5m a Nagyteremhez közelebb eső részen helyezkedik el, míg a Mandula melynek keresztmetszete 0,7x0,4m a Galériához esik közelebb. A diagramon (*4. ábra*) is jól látszik, hogy mennyire szorosan együtt változik a hőmérsékletük, de a Mandula esetében a minimum és maximum értékek mindig egy kissé magasabb értékeket vesz fel, köszönhetően a szűkebb keresztmetszetnek, mely felgyorsítja a légáramlatot. A Leyla is és a Mandula adatai is a Háztető adataival mutatnak szoros kapcsolatot, mindkét esetben 0,88 a korreláció értéke, mivel a Háztetőn is már sokkal tompítottabban jelennek meg a felszíni hatások.

4.2. A Trió-barlang

A mérés 2012 április 19.-től 2012 június 16.-ig tartott. A barlangba 12 db szenzort helyeztünk el (*2. ábra*). A műszerek mind a bejárat szakasztól kezdve az akna soron át a két végponton is mértek. Az adott időszakban rögzítettük, hogy mikor látogatták csoportok a barlangot illetve hány fő voltak az egyes csoportokban. Megállapítható, hogy a végpontokon magasabb az átlaghőmérséklet, mint a bejárat szakaszon. Ugyanakkor a 3. aknától már nem érvényesül a felszíni hőmérséklet hatása.

Búboskemence adatsorán jól megfigyelhető az egyes csoportok okozta hőmérséklet-emelkedés (*5. ábra*). Feljegyeztük a barlangba látogató csoportok számát, melyet összevetettünk a barlangi levegő hőmérsékletváltozásával. Megállapítottuk, hogy egy napon belül 28 ember fordult meg a barlangban, ami ott 1°C hőmérséklet-emelkedést idézett elő. A 2 hónapig tartó mérési sorozat jól mutatja a napi hőingást (0,05°C). Továbbá a hőmérsékletnek egy emelkedő trendje is megfigyelhető, melynek értéke 0,4°C. Ez utóbbi azzal magyarázható, hogy a vizsgált időtartam alatt egyre emelkedett a felszíni napi átlaghőmérséklet (*5. ábra*).



5. ábra. A Búboskemence mellett rögzített hőmérsékletváltozás és a látogató csoportok létszáma közötti összefüggés (2012 április 19. – 2012 június 16)

Figure 5 Relationship between the cave air temperature and the number of visitors at "Beehive oven", Trió Cave (April 19, 2012 – June 16, 2012).

5. Következtetések

A barlangok klímájának mérése és vizsgálata jelenösen elősegíti a barlangi környezet hatótényezőinek megismerését.

Az eddigi kutatásaink alapján nyilvánvaló, hogy az általunk alkalmazott vezeték nélküli szenzorhálózat eszközei közül választott UC Mote Mini alkalmas a barlangi paraméterek vizsgálatára. Mindkét barlang esetében jól látszódik a különböző járatok közötti hőmérséklet-különbség.

A Hajnóczy-barlang esetében a 2012. évi tavaszi mérés során a barlang vizsgált szakszán az átlagos hőmérséklet $4,7-10,8^{\circ}\text{C}$ között változik. A felszíni napi hőmérséklet ingás a barlangban a Manduláig érzékelhető. A korrelációs mátrix segítségével bemutattuk a szoros kapcsolatban álló adatokat, mint a Leyla is és a Mandula adatai, amelyek a Háztető adataival mutatnak szoros kapcsolatot, mindkét esetben $0,88$ a korreláció értéke

A Trió-barlangban antropogén hatást mutattunk ki, mely akár mindössze 3 látogató esetében $0,05^{\circ}\text{C}$ lehet, de 28 fő esetében a $0,6^{\circ}\text{C}$ -ot is elérheti.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet mondanak Dr. Maróti Miklósnak Varga Csabának, és Mező Ákosnak, valamint a Szegedi Karszt és Barlangkutató Egyesületnek, főként Bauer Mártonnak a műszerek telepítésében nyújtott segítségért.

"A kutatás az Európai Unió és Magyarország támogatásával a TÁMOP 4.2.4.A/2-11-1-2012-0001 azonosító számú "Nemzeti Kiválóság Program - Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése országos program" című kiemelt projekt keretei között valósult meg."

Az eszközöket a TÁMOP-4.2.2/08/1/2008-0008 keretében a Nemzeti Fejlesztési Ügynökség támogatta.

IRODALOM

BARTA K. (2009): Terepi segédlet Nyugat-Mecseki-Karszt, - Szeged, pp.1-9.

BAUER M., M. - TÓTH T. (2011): A mikrotörés hálózat szerepe a barlangok fejlődésében az Orfűi Vízfő-forrás vízgyűjtőjén - Karsztfejlődés XVI. pp. 101.

FODOR I. (1981): A barlangok éghajlati és bioklimatológiai sajátosságai - Akadémia Kiadó, Budapest, pp. 168-169

JAKUCS L. (1999): Tüdő asztma és speleoklimatológia – In: Tóth J., Wilhelm Z.(szerk.) Változó környezetünk, - Pécs, pp. 165-181

KAFFAI O. - IMECS Z. (2008): Mikroklimatológiai mérések a Körösrévi Zichy-barlangban - Karsztfejlődés XIII. pp. 269-277.

MIKLÓS G. (1978): A Hajnóczy-barlang mikroklímája - Karszt és Barlang I-II. füzet, Budapest, pp. 11-18

MULADI B. - CSÉPE Z. - MUCSI L. - PUSKÁS I. (2012): Application of wireless sensor networks in Mecsek mountain's caves - Proceedings of the 13th National Congress of Speleology, Moutathal, Schweiz, pp. 131-137.

PÉCZELY GY. (1979): Éghajlattan – Tankönyvkiadó, Budapest, pp.305-306

RAJCSY M. (2000): Klimatológiai mérések – In: Börcsök P.(szerk.) Barlang kutatásvezetői ismeretek – MKBT, Budapest, pp.137-139

VARGA CS. (2003): Hajnóczy-barlang – In: Székely K. (szerk.): Magyarország fokozottan védett barlangjai pp. 200-204